

Корх Ю. В., Сташков А. Н., Ринкевич А. Б.
ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ И МАРТЕНСИТНО-СТАРЕЮЩИХ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ

В данной работе метод сканирующей акустической микроскопии использовался для изучения процессов разрушения образцов из ряда сталей (жаропрочных, мартенситно-старееющих). Проведен анализ накопления микроповреждений в металле растянутых зон гибов паропроводов, изготовленных из жаропрочной стали 12Х1МФ. Акустическая визуализация развивающихся микроповреждений также проводилась на различных этапах деформирования образцов из мартенситно-старееющих сталей вплоть до разрушения для различных областей сканирования вблизи зоны концентрации напряжений и вдали от нее. Полученные с помощью акустической микроскопии результаты несут новую информацию о характере разрушения объектов из жаропрочных и мартенситно-старееющих сталей под действием деформации и могут быть использованы при выборе оптимальных режимов их термообработки.

Ключевые слова: акустическая микроскопия, пластическая деформация, температура старения, микродефекты.

Длительная эксплуатация стальных объектов при повышенных температурах, давлениях, деформационных воздействиях сопровождается необратимыми изменениями микроструктуры металла. Постепенное накопление микроповрежденности ухудшает прочностные свойства металла и может привести к внезапным аварийным разрушениям. Ранняя диагностика наличия в материале зарождающихся микродефектов и степени их опасности особенно актуальна при контроле объектов повышенной опасности, от безопасной эксплуатации которых зависит жизнеобеспечение большой массы людей.

Существующие методы неразрушающего контроля малочувствительны к микромасштабным дефектам, позволяя детектировать наличие уже достаточно крупных дефектов. Контроль микроструктуры металла возможен традиционной металлографией [1], проведение которой связано с вырезкой из эксплуатирующихся узлов и деталей, что малопригодно на практике и экономически нецелесообразно. Метод акустической микроскопии [2] открывает новые возможности послойной визуализации и изучения поверхностной и подповерхностной структуры объекта без специальной подготовки образца. Если в традиционной ультразвуковой дефектоскопии используются ультразвуковые волны с частотами 2–15 МГц, что позволяет выявлять дефекты размером не менее 1 мм, то сканирующие акустические микроскопы работают на частотах от 50 МГц до 2–4 ГГц, что обеспечивает разрешающую способность до 0,1–0,2 мкм. При этом акустические волны, представляющие собой волны упругой механической деформации в среде, дают качественно другую информацию об исследуемом объекте по сравнению с оптической или электронной микроскопией. Способность высокочастотных акустических волн проникать в глубь различных материалов дает возможность без разрушения изделия получать пространственные изображения внутренней структуры объектов в том числе, из оптически непрозрачных материалов.

В данной работе метод сканирующей акустической микроскопии использовался для изучения процессов разрушения образцов из ряда сталей (жаропрочных, мартенситно-стареющих). Высокая чувствительность акустических волн к наличию микронесплошностей и разрывов среды позволяет получать высококонтрастные акустические изображения накапливающихся повреждений на различных глубинах материала. Для исследований использовался лабораторный сканирующий высокочастотный акустический микроскоп [2] с частотой излучения, сфокусированных продольных упругих волн $f = 400\text{--}410$ МГц. Разрешающая способность акустического микроскопа на данной частоте излучения составляет 2–3 мкм. Установка акустического

микроскопа включает разработанное двухкоординатное сканирующее устройство, автоматизированное управление сбором и обработкой экспериментальных данных на основе персонального компьютера.

Интерес в работе представляло исследование накопления микроповреждений в металле растянутых зон гибов паропроводов, изготовленных из жаропрочной стали 12Х1МФ. Эксплуатация теплоэнергетического оборудования при температурах 500 °С и выше происходит в условиях ползучести, когда появляющиеся в металле микропоры сливаются в микротрещины, перерастающие в крупные трещины, что требует мониторинга стареющего оборудования с целью предотвращения аварийных ситуаций. На рис. 1 показан пример получаемых акустических изображений образцов, вырезанных из сжатой (рис. 1, а) и растянутой стороны части (рис. 1, б)гиба паропровода, эксплуатировавшегося на ТЭС в течение 150000 ч при $T = 550$ °С и давлении $P = 13$ МПа. Видно, что в растянутой частигиба (рис. 1, б), испытывающей деформацию на изгиб, в первую очередь начинают появляться микропоры, цепочка из которых постепенно перерастает в потенциально опасные микротрещины. Образец из сжатой частигиба в течение данного времени эксплуатации оказался менее поврежденным (условно бездефектным): из рис. 1 (а) видно только зарождение отдельных точечных микропор по границам зерен.

Пример применения метода сканирующей акустической микроскопии для исследования мартенситно-стареющих сталей приведен на рис. 2. Особенностью мартенситно-стареющих сталей является их высокая прочность при достаточной пластичности, высокой коррозионной стойкости и низкой склонности к хрупкому разрушению, что широко используется в судостроении и ракетостроении, при производстве тонкостенных конструкций двигателей и газогенераторов [3]. Однако различные режимы термообработки, а также устойчивость и количество остаточного аустенита существенно влияют на механические свойства таких сталей, их склонность к трещинообразованию и охрупчиванию под действием

нагрузок. В данной работе исследовались процессы разрушения четырех образцов из мартенситно-стареющей стали ЧС-5ВИ (С – 0,01; Ni – 18,30; Ti – 0,78; Mo – 3,33 вес. %) после термообработки (заковки и старения при 350, 560, 580 и 660 °С) и последующей пластической деформации растяжением вплоть до их разрушения. Различные режимы термообработки влияли на содержание остаточного аустенита (от 2 до 40 %) в матрице мартенситно-стареющей стали, что определяло различную устойчивость образцов к прикладываемой нагрузке. Акустическая визуализация развивающихся микроповреждений проводилась на различных этапах деформирования образцов вплоть до разрушения. На рис. 2 приведены примеры акустических изображений области перед шейкой, полученные после разрушения образцов.

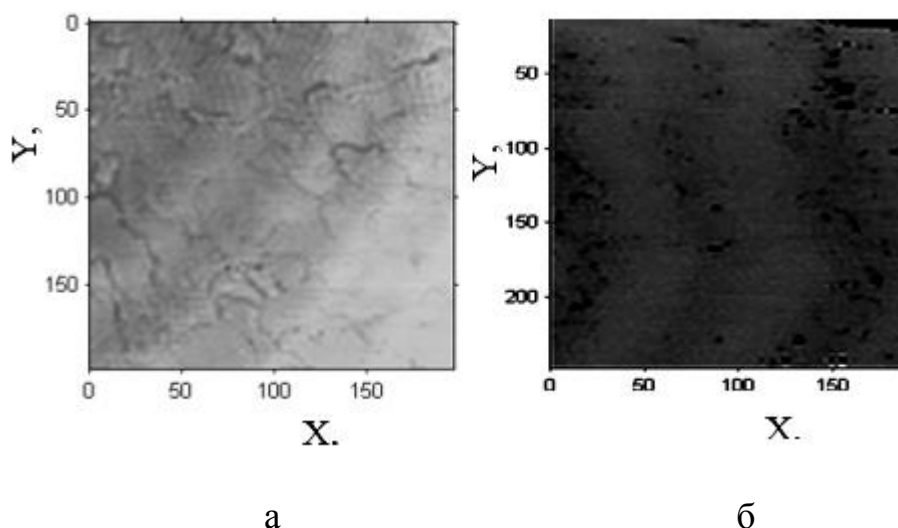


Рис. 1. Акустические изображения образцов, вырезанных из сжатой стороны – а; из растянутой стороны – б,гиба паропровода. Фокусировка акустических волн на глубине $\Delta z = 10$ мкм под поверхностью образца, поле сканирования 200х200 мкм, шаг по осям X и Y – 2,5 мкм

Из рис. 2 видно охрупчивающее растрескивание металла для образца 4 с наибольшей температурой заковки и старения (рис. 2, г) и образца 2 (рис. 2, б), в то время как подповерхностные области вблизи шейки для образцов 1 (рис. 2, а) и 3 (рис. 2, в) не содержат ветвящихся микротрещин, а только точечные микропоры и формирующиеся цепочки микропор. Подобные акустические

изображения были получены для различных областей сканирования вблизи зоны концентрации напряжений и вдали от нее для данных образцов, испытывающих деформацию. Полученные с помощью акустической микроскопии результаты несут новую информацию о характере разрушения объектов из мартенситно-старееющих сталей под действием деформации и могут быть использованы при выборе оптимальных режимов их термообработки.

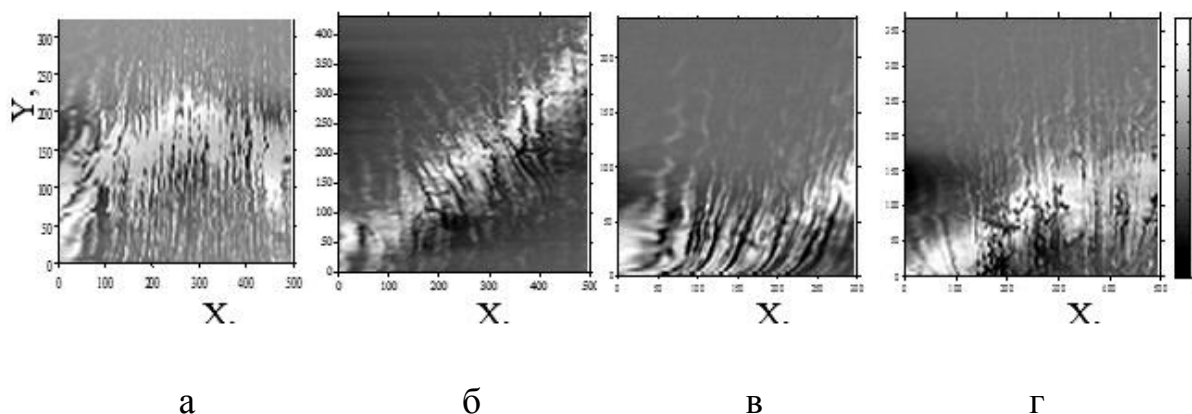


Рис. 2. Акустические подповерхностные изображения зоны вблизи шейки, полученные после разрыва образцов, характеризующихся следующими параметрами температуры закалки и содержанием остаточного аустенита (ОА): а – образец 1 (350 °С, ОА 2 %); б – образец 2 (560 °С, ОА 15 %); в – образец 3 (580 °С, ОА 40 %); г – образец 4 (680 °С, ОА 7 %)

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Диагностика» № 01201463329 (проект №12-П-2-1057) при поддержке РФФИ (проект № 12-08-33098 мол_а_вед).

Литература

1. Артамонов В. В. К вопросу неразрушающего контроля структуры металла в теплоэнергетике // Контроль. Диагностика. 2003. № 4. С. 31–38.
2. Корх Ю. В., Бурханов А. М., Ринкевич А. Б. Сканирующий акустический микроскоп для визуализации микродефектов в твердых телах // Дефектоскопия. 2009. № 10. С. 16–26.
3. Магнитные свойства мартенситно-старееющей стали ВНС-2УШ,

подвергнутой пластической деформации / А. Н. Сташков, В. М. Сомова, Е. Ю. Сажина, Л. А. Сташкова, В. С. Ногин, А. П. Ничипурук // Дефектоскопия. 2013. № 12. С. 41–52.